

焊接电弧与活性组元对 TIG 焊熔池形貌影响的数值模拟

董文超, 陆善平, 李殿中, 李依依

(中国科学院金属研究所 沈阳材料科学国家(联合)实验室, 沈阳 110016)

摘 要: 通过对 FLUENT 软件进行二次开发, 建立了焊接电弧和焊接熔池模型, 模拟分析了不同活性组元 O 元素含量下定点和移动 TIG 焊熔池形貌变化, 对比了氩弧和氦弧的电弧参量及其对熔池形貌的影响. 结果表明, 由活性组元 O 元素含量变化导致的熔池内 Marangoni 对流变化是熔深增加的主要因素; 在氩弧下, 来自于电弧的气体剪切力对熔池形貌有较大影响; 与氩弧相比, 氦弧明显收缩, 电流密度更大, 更多的热量传递到熔池, 增大了电磁力引起的内对流运动, 可获得更深熔深. 焊缝深宽比的模拟结果与试验结果吻合较好.

关键词: 熔池形貌; 焊接电弧; 活性组元; 数值模拟

中图分类号: TG401 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2009)11-0049-04



董文超

0 序 言

钨极惰性气体保护焊(TIG 焊)焊接过程稳定, 保护效果好, 在工业生产中得到了广泛应用. 但由于钨极载流有限, 焊缝熔深浅, 制约了 TIG 焊焊接效率的提高. 增加 TIG 焊焊缝深宽比、提高 TIG 焊焊接效率是一个既有理论意义又有应用背景的课题. 20 世纪 60 年代初, 前苏联巴顿焊接研究所发明了 A-TIG 焊工艺^[1], 由于该工艺可以显著增加熔深, 所以获得了很多研究者的注意. 与工艺的发展相比, 熔深增加机理存在较大争论. 关于 A-TIG 焊熔深增加机理, 先后出现了如下几种观点^[1-3]: (1) TIG 穿孔模型; (2) 电弧收缩理论; (3) Marangoni 对流方向改变理论; (4) 绝缘层模型. 熔焊过程中, 熔池的形成和凝固速度快, 再加上电弧的高温干扰, 很难通过试验的方法直接观察到熔池内对流运动及其演变过程, 数值模拟为研究熔池形貌演变提供了一个有效途径.

熔池的演变过程直接受上方焊接电弧的影响. 从事焊接熔池冶金的研究者往往忽略焊接电弧的重要影响, 而从事电弧物理的研究者往往不考虑其对熔池形貌的影响. 采用数值模拟与试验结合的方法, 研究焊接电弧特性及其对熔池形貌的重要影响,

分析熔池形成过程和影响其形貌的重要因素, 对于认清熔池形成机理具有重要意义, 也为开发新的焊接工艺, 提高 TIG 焊焊接效率提供了理论基础.

文中通过对 FLUENT6.2 软件进行二次开发, 编制用户子程序, 加入复杂的源项和边界条件, 建立了焊接电弧模型与 SUS304 不锈钢定点和移动 TIG 焊过程的熔池模型. 首先分析了定点 TIG 焊过程熔池形貌随活性组元 O 元素含量的变化, 探究熔深增加机理, 然后通过耦合模拟电弧模型与熔池模型, 分析了移动 TIG 焊过程活性组元 O 元素含量对熔池形貌的影响. 最后, 模拟分析了氩弧和氦弧的电弧特性及其对熔池形貌的影响, 为开发高效率 TIG 焊工艺提供理论指导.

1 数学模型

假设焊接电流为二维轴对称、稳态、满足局域热力学(LTE)平衡的等离子体; 焊接熔池为三维且沿电弧移动方向对称, 熔池内液态金属为层流、不可压缩的牛顿流体; 焊件为 SUS304 不锈钢, 除表面张力温度梯度系数、热导率和粘度外, 其余热物理性能参数与温度无关.

根据以上假设, 可建立描述稳态焊接电弧与熔池的通用控制方程为

$$\nabla \cdot (\rho V \Phi) = \nabla \cdot (D_{\Phi} \nabla \Phi) + S_{\Phi} \quad (1)$$

式中: ρ 为母材密度; V 为不同方向速度; Φ 为任一

控制变量; D_ϕ 为扩散系数; S_ϕ 为源项. 详细的表达式见文献[4,5].

当求解移动 TIG 焊熔池时,为考虑焊接速度对熔池内流体流动和传热的影响,在稳态 TIG 焊熔池的动量守恒方程和能量守恒方程的右侧加入由电弧移动引起的源项 $\partial(\rho v_0 V)/\partial x$ (v_0 为焊接速度).

对于焊接电弧,最关键的边界条件是阴极斑点半径处的电势. 根据 McKelliget 等人^[6]的研究结果,设定阴极斑点半径处的电流密度为 $6.5 \times 10^7 \text{ A/m}^2$. 此外,还需在阴极和阳极表面加入额外的热量,详细的表达式见文献[5]. 对于焊接熔池模型,熔池上表面的边界条件的设置最为关键,将通过焊接电弧模型计算所得的热流密度、电流密度和气体剪切力加入. 熔池表面的表面张力采用 Sahoo 等人^[7]的研究结果,即表面张力温度梯度系数与熔池内活性组元含量和熔池表面温度有关,公式为

$$\frac{\partial \gamma}{\partial T} = -A_\gamma - RD_s \ln(1 + K_{\text{seg}} a_i) - \frac{K_{\text{seg}} a_i}{1 + K_{\text{seg}} a_i} \frac{D_s \Delta H^\circ}{T} \quad (2)$$

$$K_{\text{seg}} = k_1 \exp\left(-\frac{\Delta H^\circ}{RT}\right) \quad (3)$$

式中: $\partial \gamma / \partial T$ 为表面张力温度梯度系数; T 为熔池表面温度; A_γ 为常数; D_s 为饱和表面过剩常数; R 为气体常数; K_{seg} 为氧组元平衡吸附系数; k_1 为与偏聚熵有关的常数; ΔH° 为标准吸附热常数; a_i 为活性组元 O 元素的含量.

保护气体氩气和氦气的热物理性能参数选自文献[8]. 氩气和氦气的辐射热损失分别取自文献[9,10]的试验结果. 焊接母材材料为 SUS304 不锈钢,其热物理性能参数与文献[4]相同.

由于熔池是沿着 y 方向对称的,故计算区域取一半为 $100 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$. 采用非均分网格,近热源处的网格相对密一些,而远离热源处的网格相对疏一些,以提高计算结果精度. 网格剖分数为 $100 \times 30 \times 30$,在 x 方向上均分,在 y 和 z 方向上呈指数形式非均匀分布,并设定热源中心点与焊件上表面中心点重合. 对于电弧,近电弧轴线和电极表面的网格相对密一些,最小的网格厚度为阳极边界层的厚度 ($0.1 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$). 利用 FLUENT6.2 软件进行温度场和速度场的求解. 在软件的相应接口处加入编写的边界条件和源项用户子程序,并编写相关程序求解电磁场.

2 模拟结果与讨论

2.1 定点 TIG 焊(氩弧)对熔池形貌的影响

图 1 和图 2 为定点 TIG 焊时获得的模拟结果与

试验结果^[11]对比图,相应的焊接工艺参数为焊接电流 160 A,电弧电压 14 V. 在定点 TIG 焊模拟中,只考虑焊接熔池的冶金过程,即忽略了来自于电弧的气体剪切力.

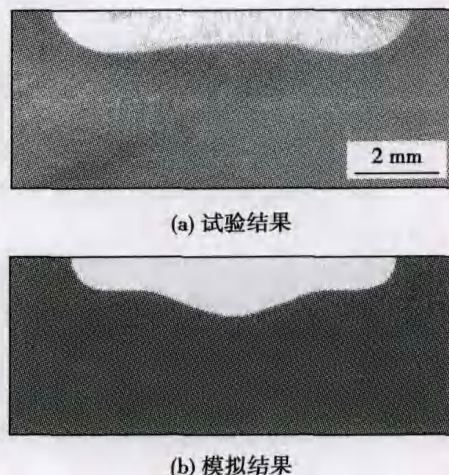


图 1 定点 TIG 焊低 O 元素含量 4.0×10^{-3} (质量分数, %) 下熔池形貌的试验结果与模拟结果对比

Fig. 1 Comparison of calculated and experimental weld shape for low oxygen content 4.0×10^{-3} in stationary TIG welding

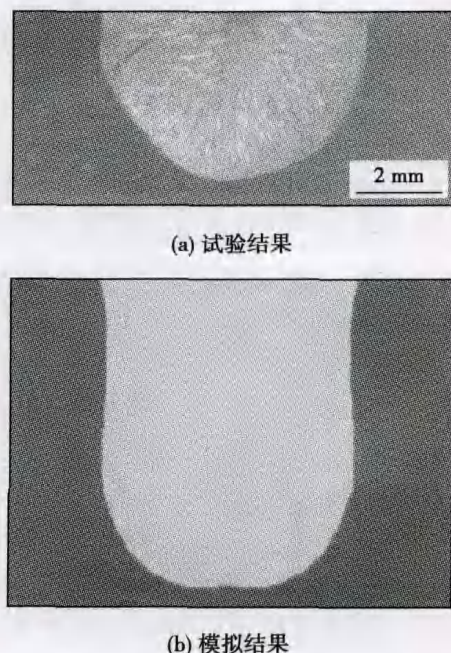


图 2 定点 TIG 焊高 O 元素含量 2.1×10^{-2} (质量分数, %) 下熔池形貌的试验结果与模拟结果对比

Fig. 2 Comparison of calculated and experimental weld shape for high oxygen content 2.1×10^{-2} in stationary TIG welding

从图 1 中可以发现,当 O 元素含量为 4.0×10^{-3} (质量分数, %) 时,熔池形貌呈宽且浅形,这是由于

熔池中 Marangoni 对流为外对流,将熔池中部阳极斑点热向熔池边部传递导致的结果. 随着 O 元素含量的增加,当 O 元素含量增大到 2.1×10^{-2} (质量分数,%)时,如图 2 所示,熔池形貌呈深且窄形. 随着活性组元 O 元素含量的增加,熔池表面的表面张力温度梯度系数的符号由正变负,从而使熔池表面的 Marangoni 对流方向由指向熔池边部的外对流转为指向熔池中心的内对流,将来自于电弧的热量从熔池中心带到熔池底部,从而减小了熔宽,增大了熔深,获得了深且窄的焊缝. 可见,活性组元 O 元素含量变化导致的熔池表面 Marangoni 对流的变化是熔深增加的主要因素.

从图 1 和图 2 模拟结果与试验结果对比发现,两者在形貌上相似,但在尺寸上差别较大. 由于在模拟中忽略了来自于电弧的气体剪切力,所以造成焊缝形貌在尺寸上存在较大差别.

2.2 移动 TIG 焊(氩弧)对熔池形貌的影响

为了考虑气体剪切力对熔池形貌的影响,避免熔池上表面对热流密度和电流密度采用 Gauss 假设而带来的计算误差,并考虑电弧移动对熔池形貌的影响,建立了焊接电弧模型,并通过耦合求解电弧模型和移动 TIG 焊熔池模型,计算了不同 O 元素含量下的熔池形貌,模拟的焊接工艺参数为焊接电流 160 A,焊接速度 2 mm/s.

图 3 和图 4 为计算所得的熔池模拟结果与试验结果^[2]对比图. 图 3 为 O 元素含量为 3.0×10^{-3} (质量分数,%)时模拟获得的结果,与定点 TIG 焊类似,在低 O 元素含量下,由于熔池表面的 Marangoni 对流为外对流,导致熔池形貌呈浅宽形;而当 O 元素含

量增大到 1.75×10^{-2} (质量分数,%)时,如图 4 所示,Marangoni 对流方向由外转内,导致熔池形貌由浅宽形转为深窄形.

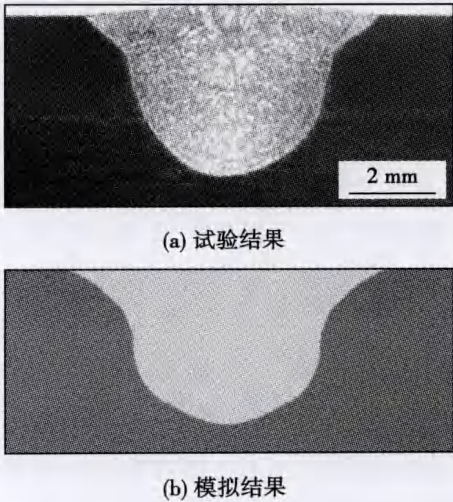


图 4 移动 TIG 焊高 O 元素含量 1.75×10^{-2} (质量分数,%) 下熔池形貌的模拟结果与试验结果对比
Fig. 4 Comparison of calculated and experimental weld shape for high oxygen content 1.75×10^{-2} in moving TIG welding

从图 3 和图 4 中的对比还可以发现,当考虑来自于焊接电弧的气体剪切力后,熔池形貌的模拟结果与试验结果不仅在形貌上相似,而且在尺寸上差别也大大减小. 这表明,在氩弧下,来自于焊接电弧的气体剪切力对熔池形貌有较大影响.

2.3 氩弧和氦弧的电弧特性及其对熔池形貌的影响

图 5 是保护气体为氩气和氦气,在焊接电流为 150 A、弧长为 5 mm 时模拟获得的电弧温度轮廓对

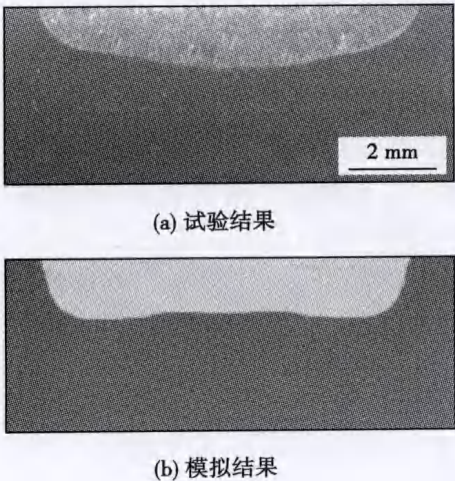


图 3 移动 TIG 焊低 O 元素含量 3.0×10^{-3} (质量分数,%) 下熔池形貌的模拟结果与试验结果对比
Fig. 3 Comparison of calculated and experimental weld shape for low oxygen content 3.0×10^{-3} in moving TIG welding

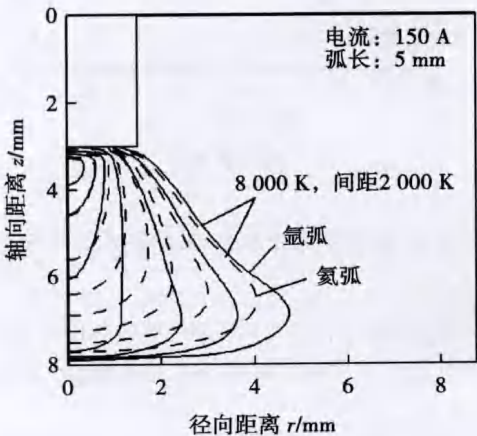


图 5 氩弧和氦弧的温度轮廓对比
Fig. 5 Comparison of temperature contours in both argon arc and helium arc

比图. 从图中可以发现, 相对于氩弧, 氦弧收缩明显.

图 6 分别显示了氩弧和氦弧下热流密度和电流密度沿阳极表面径向的分布. 氦弧下, 阳极表面的热流密度和电流密度的峰值均比氩弧时要高, 且分布半径减小, 氦弧相比氩弧是收缩的. 由于氦弧的收缩, 导致氦弧下传递到阳极表面的热量与电流密度更多、更集中, 熔池中的电磁力也更大. 造成氦弧比氩弧径向收缩的主要原因在于氩气和氦气的热物性能参数不同. 由于氦气的电离势很高, 所以, 当温度低于 10 000 K 时, 氦等离子体的电导率要明显小于氩等离子体的. 例如, 温度为 8 000 K 时, 氦等离子体的电导率仅仅为 $1 \text{ A}/(\text{V}\cdot\text{m})$, 而氩等离子体的电导率却高达 $1\,000 \text{ A}/(\text{V}\cdot\text{m})$ ^[9,10]. 氦气的低电导率减小了电流通道的直径, 导致氦弧更容易收缩到电弧轴线附近, 使得氦弧比氩弧收缩明显.

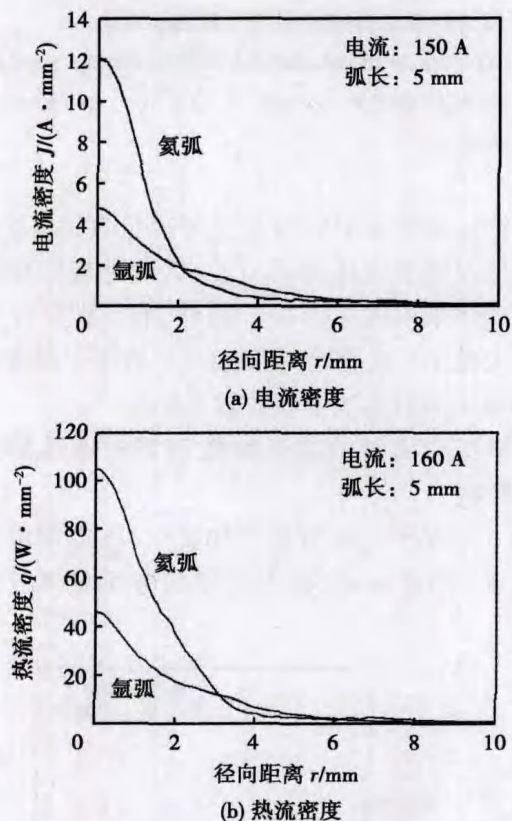


图 6 氩弧和氦弧下电流密度和热流密度沿阳极表面径向分布对比

Fig. 6 Comparison of radial distribution of current density and heat flux on anode surface in both argon arc and helium arc

图 7 为氩弧和氦弧下, 活性组元 O 元素含量对熔池形貌(焊缝深宽比)影响的模拟结果与试验结果^[2,3]对比图. 从图中可以发现, 无论是在氩弧还是

在氦弧下, 随着活性组元 O 元素含量的增加, 焊缝深宽比先增大而后几乎保持不变. 与氩弧相比, 氦弧下焊缝深宽比增大. 由于氦弧收缩, 导致熔池中的电磁力相比氩弧的增大. 电磁力在液态熔池中产生的是内对流, 促使阳极斑点热向熔池底部传输而增加熔深, 进而增加焊缝深宽比. 对比模拟结果与试验结果发现, 两者吻合较好.

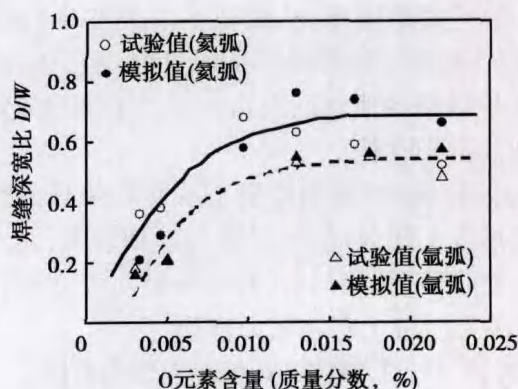


图 7 氩弧与氦弧下不同 O 元素含量下焊缝深宽比的模拟结果与试验结果对比

Fig. 7 Comparison of calculated and experimental weld D/W ratio under different oxygen contents in both argon arc and helium arc

3 结 论

(1) 定点和移动 TIG 焊模拟结果表明, 活性组元 O 元素含量的变化导致的 Marangoni 对流的变化是熔深增加的主要因素; 气体剪切力对熔池形貌有较大影响, 考虑气体剪切力后, 熔池形貌的模拟结果与试验结果吻合更好.

(2) 相同焊接工艺参数下, 与氩弧相比, 氦弧径向收缩明显, 电流密度更大, 更多的热量传递到阳极, 使熔池中的电磁力增大, 可获得更深熔深.

(3) 无论是在氩弧还是在氦弧下, 随着活性组元 O 元素含量的增加, 焊缝深宽比先增大而后几乎保持不变. 相比氩弧, 由于氦弧下熔池中电磁力引起的内对流加强, 所以可获得具有更高深宽比的焊缝.

参考文献:

- [1] Lu S P, Li D Z, Fujii H, et al. Time dependant weld shape in Ar-O₂ shielded stationary GTA welding[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2007, 23(5): 650-654.

[下转第 56 页]

化合物中镍的含量均随老化时间的增加而增加。

(2) SAC0307/Ni 和 SAC0307-0.05Ni/Ni 焊点界面的 IMC 厚度均与老化时间的平方根近似成线性关系. SAC0307-0.05Ni/Ni 比 SAC0307 焊点的 IMC 厚度小, 老化过程中的生长速率降低. 钎料中添加 0.05% Ni(质量分数)可以有效地抑制回流后和老化过程中 IMC 的生成和长大。

(3) 回流焊后, SAC0307/Ni 的焊盘剩余镍层厚度与 SAC0307-0.05Ni/Ni 的相近. 经过 180 °C 老化 384 h 后, SAC0307/Ni 的焊盘剩余镍层厚度明显比 SAC0307-0.05Ni/Ni 的小. 钎料中加入 0.05% Ni(质量分数)后显著降低了焊盘镍层在老化过程中的消耗速度即显著提高了镍焊盘的抗老化能力。

参考文献:

- [1] 唐兴勇, 王 裙, 谷 博, 等. 老化对 Sn-Ag-Cu 焊料/Ni-P 镀层界面结构和剪切强度的影响[J]. 金属学报, 2006, 42(2): 205 - 210.
Tang Xingyong, Wang Jun, Gu Bo, *et al.* Effects of aging on structures and shear strength of interface of Sn-Ag-Cu solder/Ni-P plating layer[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2006, 42(2): 205 - 210.
- [2] Pang J H L, Low T H, Xiong B S, *et al.* Thermal cycling aging effects on SnAgCu solder joint microstructure, IMC and strength[J]. Thin Solid Films, 2004, 462(7): 370 - 375.
- [3] Kim K S, Yu C H, Yang J M. Aging treatment characteristics of solder bump joint for high reliability optical module[J]. Thin Solid Films, 2004, 462(7): 402 - 407.
- [4] 李晓延, 杨晓华, 兑卫真, 等. 时效对 Sn-3.8Ag-0.7Cu/Cu 焊料接头的组织和拉伸性能的影响[J]. 机械强度, 2008, 30(1): 24 - 28.
Li Xiaoyan, Yang Xiaohua, Dui Weizhen, *et al.* Effect of aging on microstructure and tensile properties of Sn-3.8Ag-0.7Cu/Cu solder joint[J]. Journal of Mechanical Strength, 2008, 30(1): 24 - 28.
- [5] 卢 斌, 栗 慧, 王娟辉, 等. 稀土 Er 对 Sn-3.0Ag-0.5Cu 无铅焊料合金组织与性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(4): 518 - 524.
Lu Bin, Li Hui, Wang Juanhui, *et al.* Effect of Er on microstructure and properties of Sn-3.0Ag-0.5Cu lead-free solder alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(4): 518 - 524.
- [6] Guo F, Choi S, Subramanian K N, *et al.* Evaluation of creep behavior of near-eutectic Sn-Ag solders containing small amount of alloy additions[J]. Mater Science Engineering A, 2003, 35(1): 190 - 199.
- [7] 史耀武, 夏志东, 雷永平, 等. 电子组装生产的无铅技术与发展趋势[J]. 电子工艺技术, 2005, 26(1): 6 - 9.
Shi Yaowu, Xia Zhidong, Lei Yongping, *et al.* Development and trend of lead-free technology for electronic assembly manufacturing[J]. Electronics Process Technology, 2005, 26(1): 6 - 9.

作者简介: 王玲玲, 女, 1984 年出生, 硕士研究生. 主要从事微电子封装技术研究. 发表论文 1 篇.

Email: jolly24@163.com

[上接第 52 页]

- [2] Lu S P, Fujii H, Sugiyama H, *et al.* Effects of oxygen additions to argon shielding gas on GTA weld shape [J]. ISIJ International, 2003, 43(10): 1590 - 1595.
- [3] Lu S P, Fujii H, Nogi K, *et al.* Effect of oxygen content in He-O₂ shielding gas on weld shape in ultra deep penetration TIG [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2007, 12(8): 689 - 695.
- [4] 董文超, 陆善平, 李殿中, 等. 微量活性组元氧对焊接熔池 Marangoni 对流和熔池形貌影响的数值模拟[J]. 金属学报, 2008, 42(2): 249 - 256.
Dong Wenchao, Lu Shanping, Li Dianzhong, *et al.* Numerical simulation of effects of the minor active-element oxygen on the Marangoni convection and the weld shape[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(2): 249 - 256.
- [5] Lu S P, Dong W C, Li D Z, *et al.* Numerical study and comparisons of gas tungsten arc properties between argon and nitrogen[J]. Computational Materials Science, 2009, 45(2): 327 - 335.
- [6] McKelliget J, Szekely J. Heat transfer and fluid flow in the welding arc[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1986, 17(7): 1139 - 1148.
- [7] Sahoo P, DebRoy T, McNallan M J. Surface tension of binary metal-surface active solute systems under conditions relevant to welding metallurgy[J]. Metallurgical Transactions B, 1988, 19B(2): 483 - 490.
- [8] Boulos M I, Fauchais P, Pfender E. Thermal plasmas-fundamentals and applications[M]. New York: Plenum, 1994.
- [9] Evans D L, Tankin R S. Measurement of emission and absorption of radiation by an argon plasma[J]. Physics of Fluids, 1967, 10(6): 1137 - 1144.
- [10] Cram L E. Statistical evaluation of radiative power losses from thermal plasmas due to spectral lines[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1985, 18(3): 401 - 412.

作者简介: 董文超, 男, 1979 年出生, 博士. 主要从事焊接电弧与熔池传热传质的数值模拟科研工作. 发表论文 2 篇.

Email: shplu@imr.ac.cn